

В данном докладе приводятся результаты разработки и экспериментального исследования умножителя частоты СВЧ диапазона с кратностью умножения 24. В рамках работы на основе простейшей схемы диодного умножителя было проведено математическое моделирование его работы при высокой кратности умножения, выявлены потенциальные возможности по коэффициенту умножения и по наиболее доступным практическим возможностям оптимизации схемы (оптимизация сопротивления нагрузки и постоянного напряжения питания на полупроводниковом диоде). Проведен расчет размеров основных конструктивных элементов выходного фильтра, выполненного в полосковом исполнении. После конструирования и изготовления действующего макета умножителя с кратностью 24 была проведена его экспериментальная настройка и дополнительная экспериментальная оптимизация схемы. Проведенное математическое моделирование показало, что с использованием серийного СВЧ диода 2A604A максимальный КПД умножителя частоты может достигать 6,8 %. Экспериментально полученный КПД после соответствующих настроек составил 0,204 %. С учетом того, что в расчетах использовалась идеализированная модель полупроводникового диода, а также того, что экспериментально достигнутый уровень потерь выходного фильтра оказался равным примерно 10 дБ, можно считать, что теоретические и экспериментальные данные находятся в достаточно хорошем согласии.

Разработанный, сконструированный и созданный умножитель частоты использован в составе формирователя частот бортовой РЛС, который по совокупности параметров не уступает лучшим отечественным и зарубежным образцам для аналогичных систем, используемых в военной технике.

Работа выполнена при поддержке предприятия ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон» (Саратов).

Литература

1. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. 3-е изд. М.: Радио и Связь, 1990. 512 с.
2. Бруевич А.Н. Умножители частоты. М.: Советское радио, 1970. 248 с.
3. Заславский А.М. Однокаскадные умножители частоты сверхвысокой кратности на диодах с накоплением заряда для синтезаторов частот // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1986. Вып. 3. С. 23-28.

ВЛИЯНИЕ ДИФфуЗИИ И ДИСПЕРСИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОДВИЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПОСТОЯННУЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В n-InN

С.А. Сергеев, А.И. Михайлов, О.С. Сенатов, Б.В. Сергеева

(Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,

Ssergeev@bk.ru, MikhailovAI@info.sgu.ru, OlegX16@yandex.ru, Bsergeeva@bk.ru)

THE INFLUENCE OF DIFFUSION AND DISPERSION OF ELECTRONS DIFFERENTIAL MOBILITY ON SPACE-CHARGE WAVES PROPAGATION CONSTANT IN n-InN

S.A. Sergeev, A.I. Mikhailov, O.S. Senatov, B.V. Sergeeva

В литературе широко обсуждаются различные свойства нитридов (GaN, AlN, InN) и их соединений при использовании их в полупроводниковых приборах, в том числе и сверхвысокочастотных [1]. Нитридные приборы работают при температурах от 200°C и выше (вплоть до 500°C) при высокой плотности мощности. Нитриды обладают высокой теплопроводностью (для InN это $\approx 0,8$ Вт/(см·К)) и радиационной стойкостью [2,3]. В основном, нит-

риды и их соединения используются в приборах с изолированным затвором и в диодах с барьером Шоттки. Напряженность электрического поля E в этих приборах составляет единицы-десятки кВ/см при достаточно высоких значениях низкополевой подвижности электронов в материалах n-типа. Кроме того, при высокой напряженности электрического поля нитриды обладают отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП), которая в InN возникает при $E \geq 75$ кВ/см [4,5].

Ширина запрещенной зоны InN порядка $0,7 \div 0,9$ эВ [2,4-6], что позволяет рассчитывать на возможность использования этого материала для изготовления фотоприемников ИК-диапазона. Нитрид индия, и особенно его твердые растворы с GaN, AlN, перспективны для применения в оптоэлектронных приборах, таких как светодиоды, лазерные диоды и солнечные батареи, а также в высокочастотной электронике [7]. Возможно применение InN в термовольтаических преобразователях [8]. InN используется как компонент при производстве сложных составных полупроводников и интересен для силовых транзисторов. InN имеет хорошие перспективы и в функциональной электронике. Для InN были предсказаны лучшие, по сравнению с другими соединениями A_3N , транспортные параметры, в частности малая эффективная масса электронов и их высокая подвижность [9,10].

Перспективным классом функциональных микроэлектронных устройств СВЧ диапазона являются устройства на волнах пространственного заряда (ВПЗ) в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью, обусловленной междолинными электронными переходами в сильных электрических полях. Эти устройства могут выполнять в СВЧ диапазоне такие радиотехнические функции как усиление, преобразование, генерация, задержка и изменение фазы сигналов и др. [11-17].

Проведенный сравнительный анализ основных свойств соединений A_3B_5 [18,19] показал, что GaN, InP, AlN и InN являются перспективными материалами для использования их в устройствах на ВПЗ.

В настоящей работе проведено исследование распространения ВПЗ в полупроводниковых структурах на основе n-InN.

Была рассмотрена система уравнений, описывающих динамику электронов в полупроводнике, состоящая из уравнений непрерывности, Пуассона и выражения для плотности полного тока с учетом диффузионной составляющей и тока смещения. Положительное направление постоянных и переменных составляющих скорости электронов, электрического поля и плотности тока выбиралось как в [20]. Используя известную одномерную модель [21] в малосигнальном приближении было получено дисперсионное уравнение для постоянной распространения ВПЗ $\gamma = \alpha + i\beta$. Из дисперсионного уравнения получено выражение для γ_1 , соответствующей прямой волне. Обратная волна быстро затухающая и не представляет практического интереса.

Был проведен численный расчет γ_1 для нитрида индия. В расчетах использовались численные значения параметров и величин, характерных для n-InN: относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 14$ [5-7,22]; для электрического поля напряженностью $E_0 = 90$ кВ/см: дрейфовая скорость электронов $v_0 = 3,2 \cdot 10^7$ см/с, коэффициент диффузии электронов $D = 50$ см²/с [5,22]. Данные по частотной зависимости дифференциальной подвижности электронов для n-InN в поле $E_0 = 90$ кВ/см были взяты из работы [23].

На рис. 1 приведены зависимости действительной α компоненты постоянной распространения γ_1 от частоты. Рисунок а) построен для структуры с равновесной концентрацией электронов $n_0 = 5 \cdot 10^{14}$ см⁻³, б) для $n_0 = 1 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Кривые с номером 1 получены с учетом только дисперсии действительной части дифференциальной подвижности электронов, с номером 2 – при учете только диффузии электронов, с номером 3 – при учете дисперсии действительной части дифференциальной подвижности электронов и диффузии электронов. Как видно из приведенных зависимостей, учет дисперсии действительной части

дифференциальной подвижности электронов приводит к ограничению области усиления ВПЗ до 290 ГГц. Учет диффузии также приводит к ограничению области усиливаемых ВПЗ, причем, с ростом концентрации n_0 растет и граничная частота f_c (с 46 ГГц при $n_0 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ до 143 ГГц при $n_0 = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$).

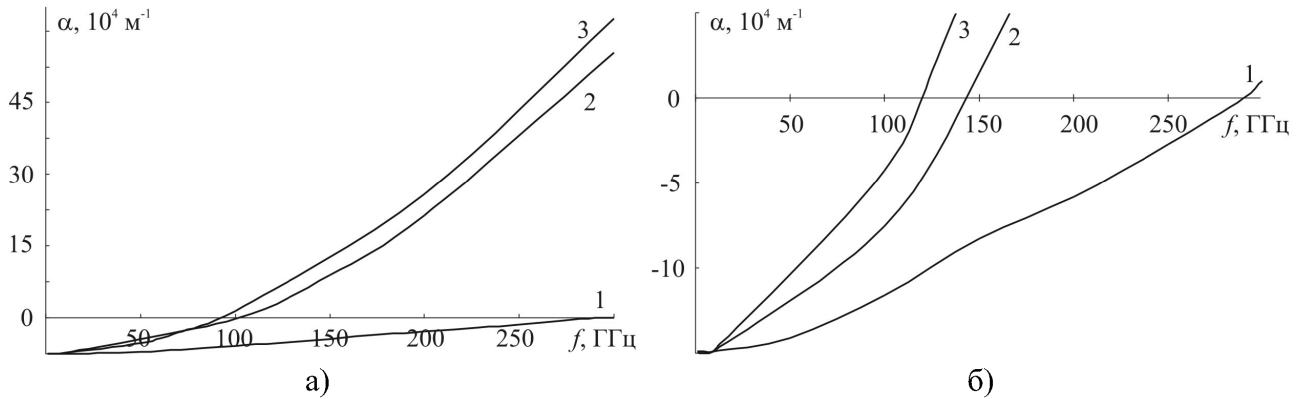


Рис. 1

Во многих работах исследования распространения ВПЗ проводятся с учетом диффузии, но без учета дисперсии дифференциальной подвижности электронов. Однако, как видно из приведенных зависимостей, учет дисперсии действительной части дифференциальной подвижности электронов приводит к значительному снижению f_c (от 2,2% при $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ до 16,1 % при $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Было выяснено, что граничная частота f_c у n-InN выше, чем у GaN (42 ГГц при $n_0 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и 125 ГГц при $n_0 = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), значительно выше, чем у GaAs (30 ГГц при $n_0 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и 73 ГГц при $n_0 = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и практически совпадает с f_c InP (45,2 ГГц при $n_0 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и 143 ГГц при $n_0 = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Диффузия практически не оказывает влияния на мнимую компоненту постоянной распространения β и $\beta \approx \omega / v_0$.

Литература

1. Боцула О.В., Прохоров Э.Д. Частотные свойства междолинного переноса электронов в нитриде галлия // Техника и приборы СВЧ. 2011. № 1. С. 24–28.
2. <http://www.ioffe.rssi.ru,Semiconductor,InN>
3. Steady-State and Transient Electron Transport Within the III–V Nitride Semiconductors, GaN, AlN, and InN: A Review / S.K. O’Leary, B.E. Foutz, M.S. Shur, L.F. Eastman // J. Mater Sci: Mater Electron. 2006. Vol. 17. P. 87–126.
4. Monte Carlo calculations of hot-electron transport and diffusion noise in GaN and InN / E. Starikov, P. Shiktorov, V. Gružinskis etc. // Semicond. Sci. Technol. 2005. Vol. 20. P. 279–285.
5. Monte-Carlo simulation of electron transport in the III-nitride wurtzite phase materials system: binaries and ternaries / M. Farahmand, C. Garetto, E. Bellotti etc. // IEEE Transaction on Electron Devices. 2001. Vol. 48. № 3. P. 535–542.
6. Electron transport in wurtzite indium nitride / S.K. O’Leary, B.E. Foutz, M.S. Shur etc. // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 83. №. 2. P. 826–829.
7. Veal T.D., McConville C.F., Schaff W.J. Indium Nitride and Related Alloys. Boca Raton: CRC Press, 2009. P. 645.
8. Шутов С.В., Аппазов Э.С. О возможности применения нитрида индия в термофотовольтаике // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 8. С. 7–11.
9. Особенности электрофизических свойств твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ / Комиссарова Т.А., Матросов Н.Н., Рябова Л.И. и др. // ФТП. 2007. Т. 41. Вып. 5. С. 558–560.

10. Оптические и электрофизические свойства InN / Т.А. Комиссарова, Н.Н. Матросов, Л.И. Рябова // XVI Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников. – Екатеринбург, 27 февраля – 4 марта 2006 г., тезисы докладов. С. 115–116.
11. Щука А.А. Функциональная электроника // Успехи современной радиоэлектроники. 2004. № 5-6. С. 149–168.
12. Перспективы интегральной электроники СВЧ / А.А. Барыбин, И.Б. Вендик, О.Г. Вендик и др. // Микроэлектроника. 1979. Т. 8. Вып. 1. С. 3–19.
13. Соляник С.П., Небогатых В.Е., Потапов А.С. Перспективные направления функциональной микроэлектроники: учеб. пособ. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. 103 с.
14. Барыбин А.А. Волны в тонкопленочных полупроводниковых структурах с горячими электронами. М.: Наука, 1986. 288 с.
15. Михайлов А.И., Сергеев С.А., Горячев А.А. Интегрированный преобразователь частоты миллиметрового диапазона длин волн на волнах пространственного заряда в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. 2000. Т. 43. № 2. С. 16–24.
16. Михайлов А.И., Сергеев С.А. Граничная частота усиления волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах на основе n-GaAs, n-InP и n-GaN // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 1. С. 33–37.
17. Михайлов А.И., Сергеев С.А. Приборы на волнах пространственного заряда в полупроводниках – перспективный класс устройств функциональной микроэлектроники / Физика и технические приложения волновых процессов: материалы X Междунар. науч.- техн. конф. `Самара: ООО «Книга», 2011. С. 131–132.
18. Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В. Возможности использования тонкопленочных структур на основе соединений A_3B_5 в устройствах на волнах пространственного заряда / Научное творчество XXI века: материалы IV Всеросс. науч.- практич. конф с международ. участием. Красноярск, 2011. Вып. 2. С. 125–127.
19. Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В. Сравнительный анализ свойств полупроводниковых материалов для функциональных устройств на волнах пространственного заряда / Физика и технические приложения волновых процессов: материалы X Междунар. науч.- техн. конф. `Самара: ООО «Книга», 2011. С. 130–131.
20. Михайлов А.И., Митин А.В. Система уравнений локально-полевой модели динамики зарядов и тока в длинных высокоомных образцах n-GaAs // Вопросы прикладной физики: Межвуз. науч. сб. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2006. Вып. 13. С. 74–78.
21. Кэррол Дж. СВЧ-генераторы на горячих электронах / Пер. с англ. М.Е. Левинштейна, М.С. Шура; Под ред. Б.Л. Гельмонта. М.: Мир, 1972. 382 с.
22. Wu J. When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives // J. of Appl. Phys. 2009. Vol. 106. P. 011101 (1–28).
23. Monte Carlo calculations of static and dynamic electron transport in nitrides / E. Starikov, P. Shiktorov, V. Gruinskis etc. // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 98. P. 083701(1–7).